9. Zjawisko Dopplera

- Opis i wyjaśnienie zjawiska Dopplera
- Zastosowania zjawiska Dopplera

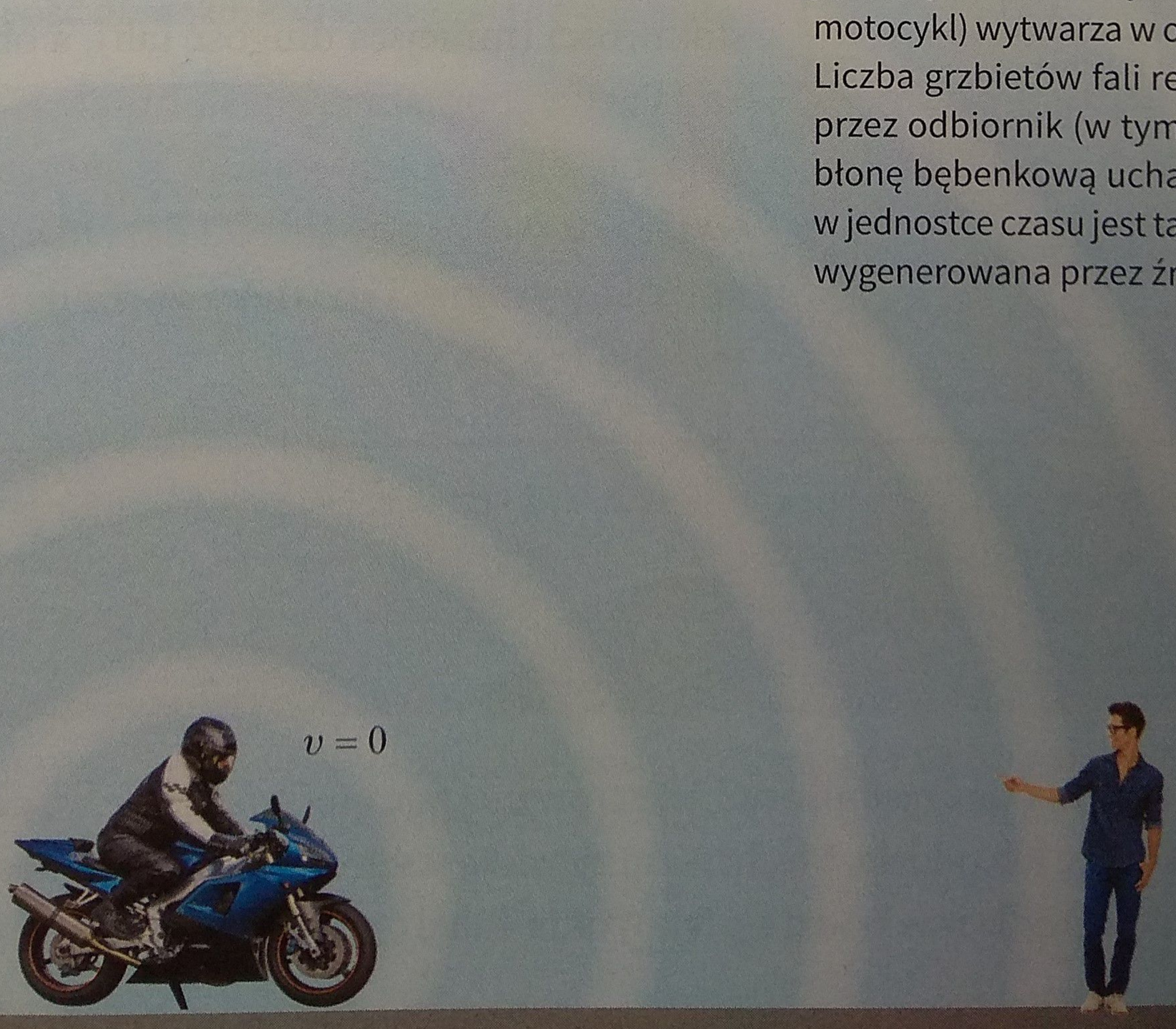
Przypomnij sobie, od czego zależy wysokość dźwięku i jaki jest związek między długością fali a jej częstotliwością.

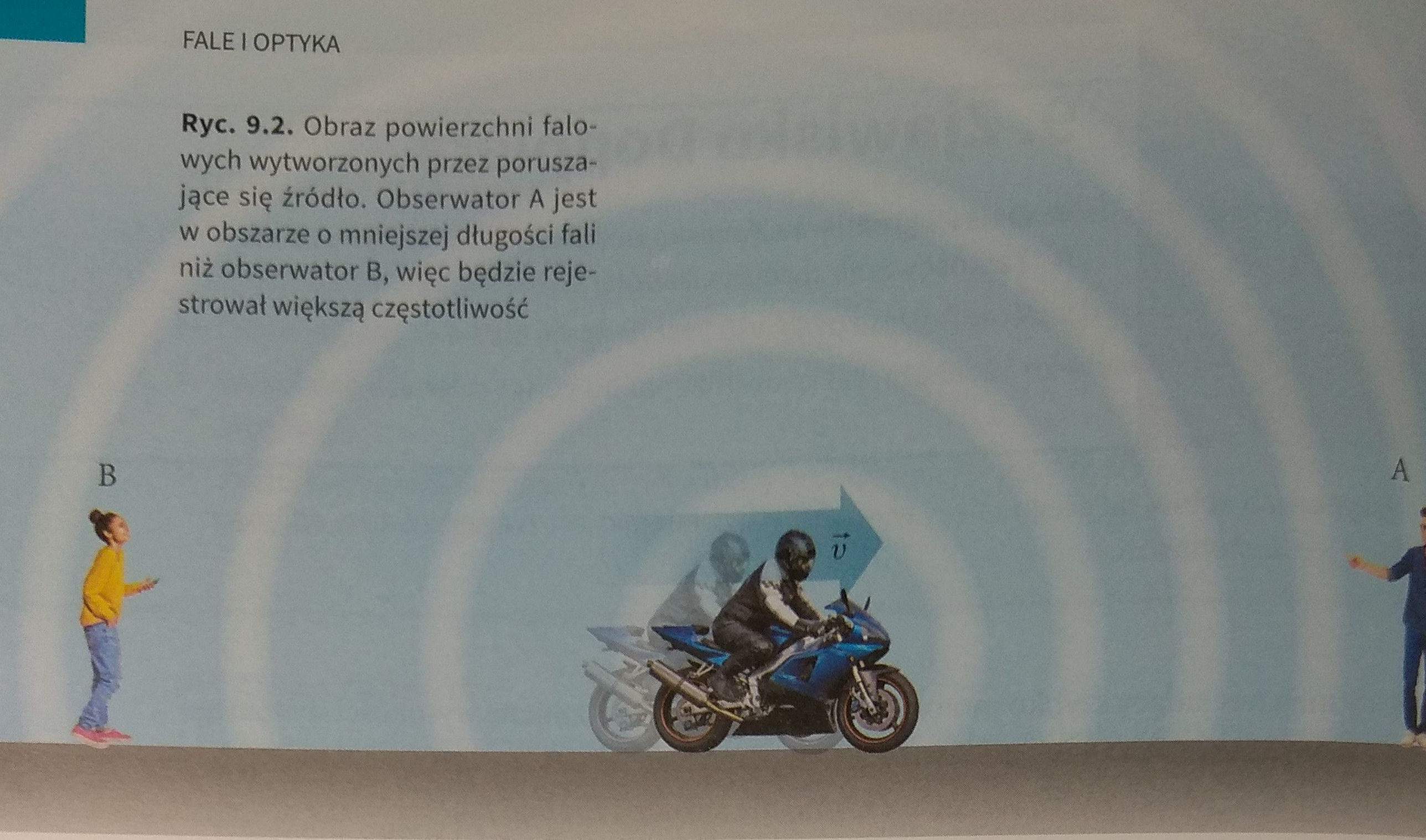
Gdy mija nas jadący szybko motocykl, możemy zauważyć zmianę wysokości słyszanego dźwięku silnika. To przykład zjawiska Dopplera. Najczęściej zauważamy je wtedy, gdy dotyczy fal dźwiękowych, ale zachodzi ono dla każdego rodzaju fal.

Ruch źródła a obraz rozchodzącej się fali

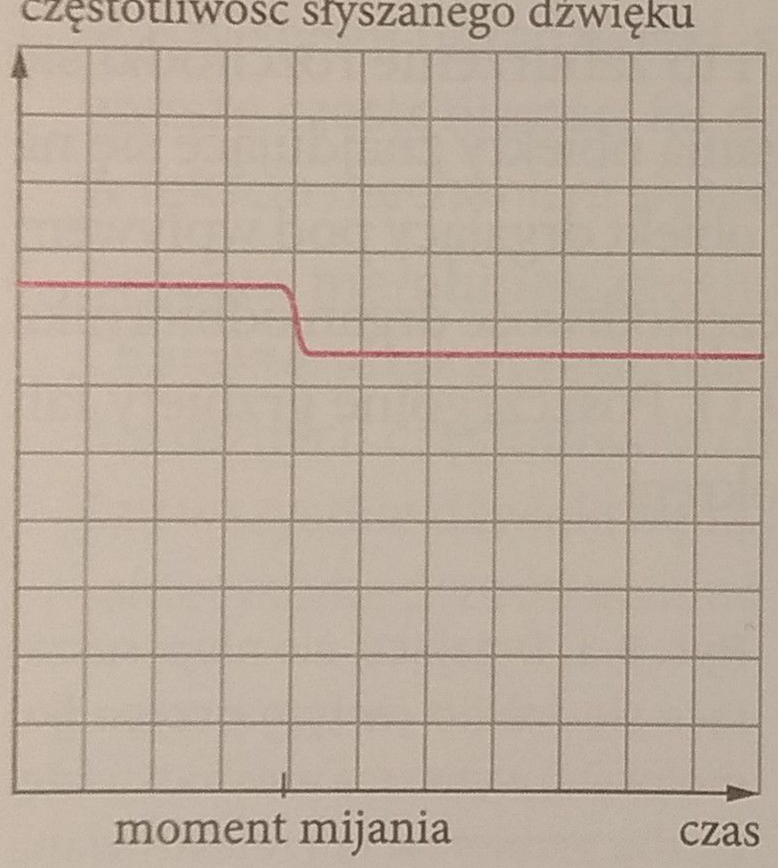
Drgające ciało zaburza ośrodek, w którym się znajduje, i to zaburzenie rozchodzi się w postaci fali. Rozchodząca się fala może wprawić w drgania obiekty znajdujące się na jej drodze. Gdy źródło fali i odbiornik (tak można nazwać obiekt drgający pod wpływem rozchodzącej się fali) są w spoczynku względem ośrodka, częstotliwość drgań odbiornika jest dokładnie równa częstotliwości drgań źródła (ryc. 9.1). Poszczególne grzbiety fali (powierzchnie falowe) tworzą wówczas współśrodkowe okręgi.

Ryc. 9.1. Drgające, ale nieporuszające się źródło (w tym przypadku motocykl) wytwarza w ośrodku falę. Liczba grzbietów fali rejestrowana przez odbiornik (w tym przypadku błonę bębenkową ucha człowieka) w jednostce czasu jest taka sama jak wygenerowana przez źródło





Ryc. 9.2. Obraz powierzchni falowych wytworzonych przez poruszające się źródło. Obserwator A jest w obszarze o mniejszej długości fali niż obserwator B, więc będzie rejestrował większą częstotliwość



Ryc. 9.3. Wykres zależności częstotliwości rejestrowanego dźwięku od czasu w sytuacji, gdy do obserwatora zbliża się źródło dźwięku, mija go i się oddala

Jednak gdy w nieruchomym ośrodku porusza się źródło fali, jej grzbiety nie układają się już koncentrycznie. Każdy grzbiet powstaje w innym miejscu. Podczas każdego kolejnego okresu drgań źródło przesuwa się o pewną odległość, stąd i środki kolejnych powierzchni falowych przesuwają się razem ze źródłem (ryc. 9.2). Przed źródłem powstaje fala o mniejszej długości, za źródłem – o większej. Obserwator, do którego zbliża się źródło fali, zarejestruje zatem falę o większej częstotliwości (mniejsza długość fali), a obserwator pozostający za poruszającym się źródłem – o mniejszej. Właśnie dlatego, gdy motocykl się zbliża, słyszymy wyższy dźwięk, a gdy się oddala – niższy. Gwałtowna **zmiana wysokości dźwięku zachodzi w momencie mijania** (ryc. 9.3).

Zjawisko Dopplera polega na tym, że gdy źródło fali zbliża się do odbiornika lub oddala się od niego, odbiornik rejestruje falę o innej częstotliwości niż nadawana. Gdy źródło fali i odbiornik zbliżają się do siebie, odbiornik rejestruje falę o większej częstotliwości, a gdy się oddalają – o mniejszej.

Podobnie zmienia się częstotliwość rejestrowanej fali, gdy źródło jest w spoczynku, a odbiornik zbliża się lub oddala. Mechanizm zjawiska jest jednak wówczas nieco inny. W tym przypadku od źródła rozchodzi się fala o określonej częstotliwości. Gdy odbiornik zbliża

się do źródła, czas, jaki mija między zarejestrowanymi kolejnymi grzbietami, jest krótszy, niż gdyby odbiornik się nie poruszał. W jednostce czasu zostanie zarejestrowanych więcej drgań, więc rejestrowana częstotliwość jest większa.

Zależność rejestrowanej częstotliwości od prędkości źródła i odbiornika

Niezależnie od tego, czy porusza się źródło fali czy odbiornik, częstotliwość rejestrowanej fali zależy od częstotliwości źródła i prędkości, z jakimi poruszają się źródło i odbiornik. Gdy prędkości te są znacznie mniejsze od prędkości fali, odbieraną częstotliwość można z dobrym przybliżeniem obliczyć ze wzoru:

$$f = f_0\left(1 \pm \frac{v}{u}\right) \tag{1}$$

gdzie:

f_0 – częstotliwość źródła fali,

f – częstotliwość rejestrowana przez odbiornik,

v – prędkość względna źródła fali i odbiornika,

u – prędkość fali.

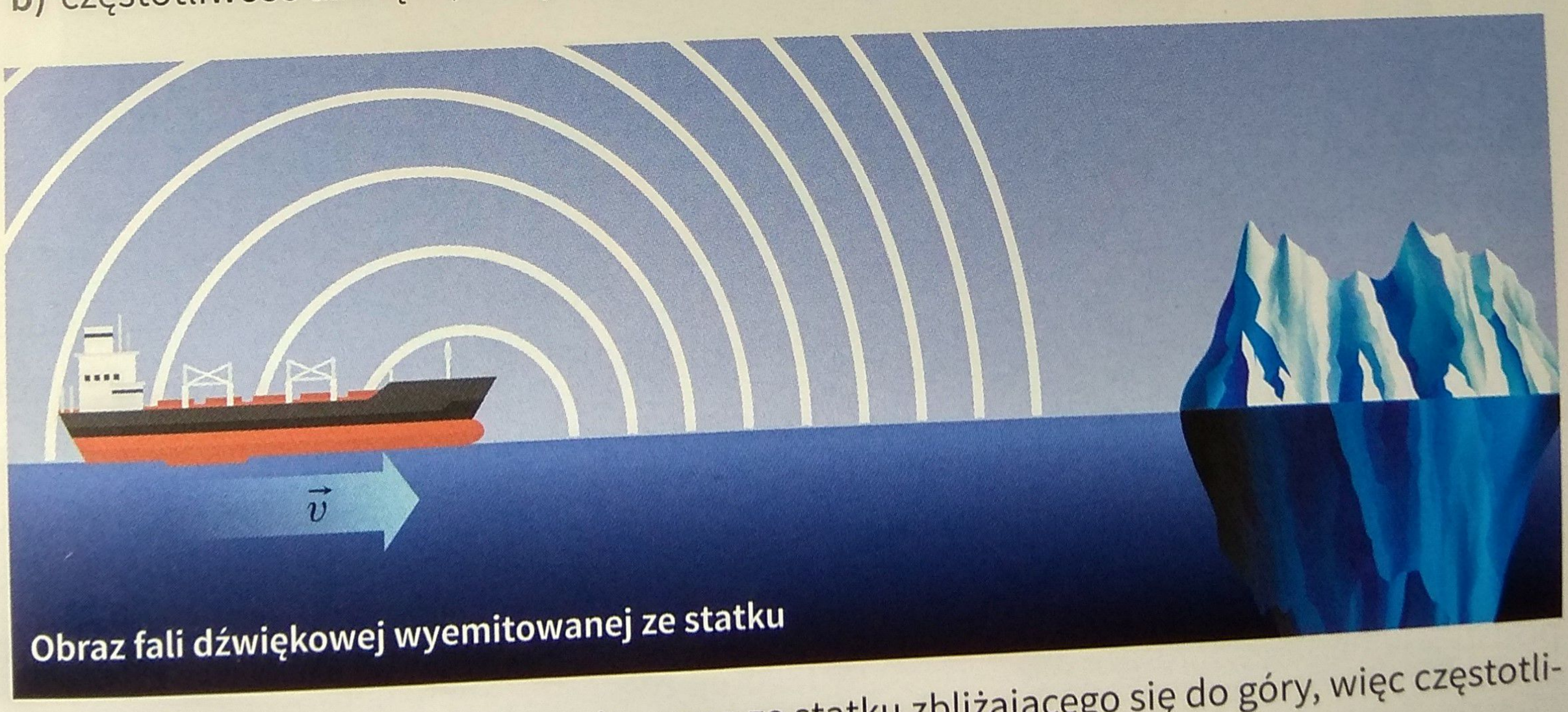
Znak „+” we wzorze piszemy w sytuacji, gdy odbiornik i źródło zbliżają się do siebie, natomiast znak „–” piszemy, gdy się oddalają.

Przykład 1.

Statek płynął w stronę góry lodowej i zbliżał się do niej z prędkością 12 m/s. W pewnym momencie syrena statku wyemitowała krótki sygnał dźwiękowy o częstotliwości 60 Hz. Po chwili załoga usłyszała echo syreny. Obliczmy:

a) częstotliwość fali dźwiękowej odbitej od góry lodowej;

b) częstotliwość dźwięku, który usłyszała załoga statku.



Obraz fali dźwiękowej wyemitowanej ze statku

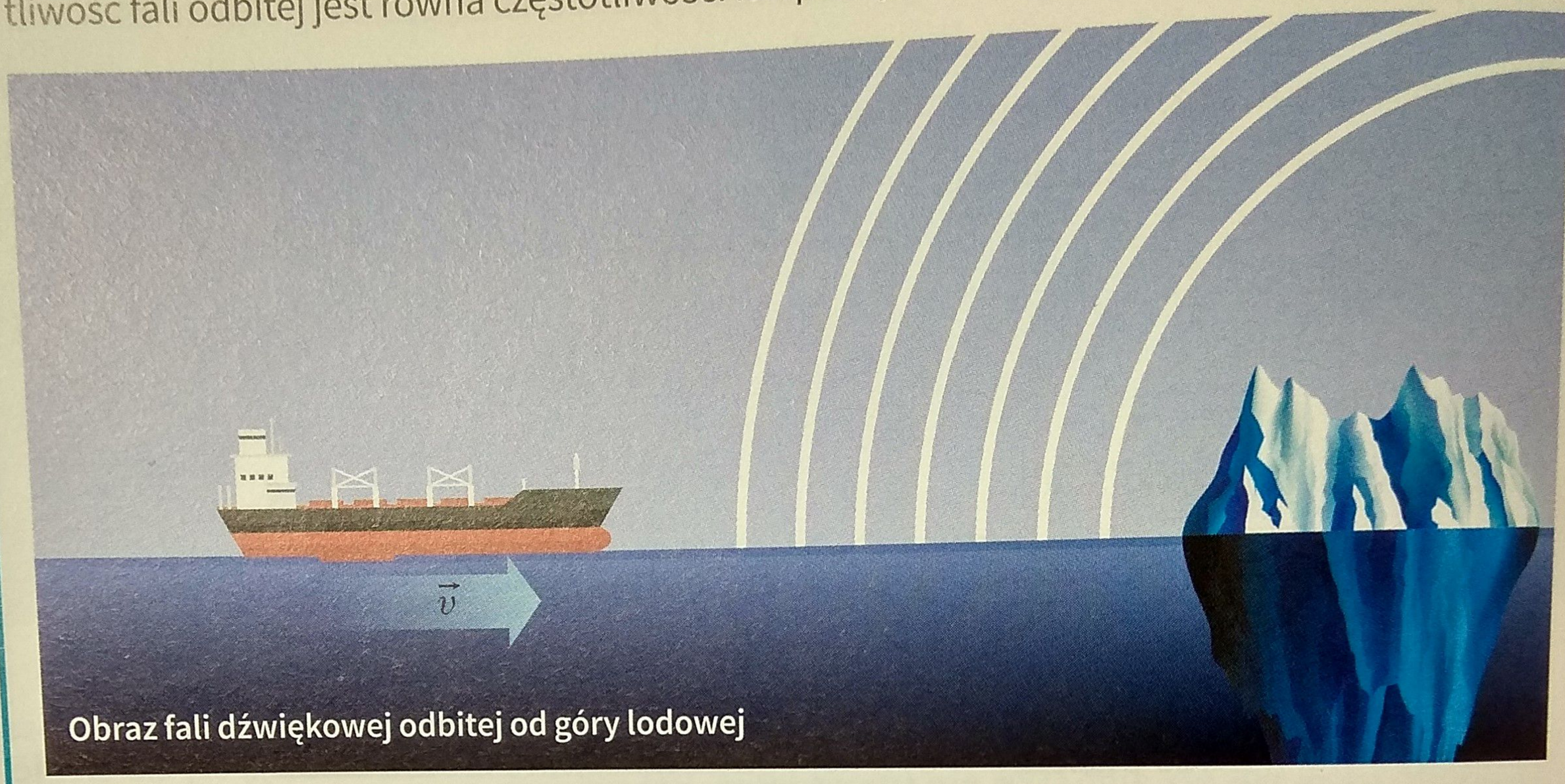
a) Fala dźwiękowa została wyemitowana ze statku zbliżającego się do góry, więc częstotliwość fali, która dotarła do góry, obliczymy ze wzoru:

$$f_1 = f_0\left(1 + \frac{v}{u}\right)$$

Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi 340 m/s, więc po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$f_1 = 60\ \text{Hz} \cdot \left(1 + \frac{12\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{340\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right) \approx 62\ \text{Hz}$$

Fala podczas odbicia od nieruchomego obiektu nie zmienia swojej częstotliwości, więc częstotliwość fali odbitej jest równa częstotliwości fali padającej na ścianę góry lodowej.



Obraz fali dźwiękowej odbitej od góry lodowej

b) Załoga statku usłyszy inny dźwięk niż ten odbity od góry, gdyż się do niej zbliża. W tej sytuacji źródłem dźwięku jest góra lodowa, a członkowie załogi – odbiornikami. Częstotliwość dźwięku, który usłyszy załoga, będzie wynosiła:

$$f_2 = f_1\left(1 + \frac{v}{u}\right)$$

$$f_2 = 62\ \text{Hz} \cdot \left(1 + \frac{12\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{340\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right) \approx 64\ \text{Hz}$$

Zastosowania zjawiska Dopplera

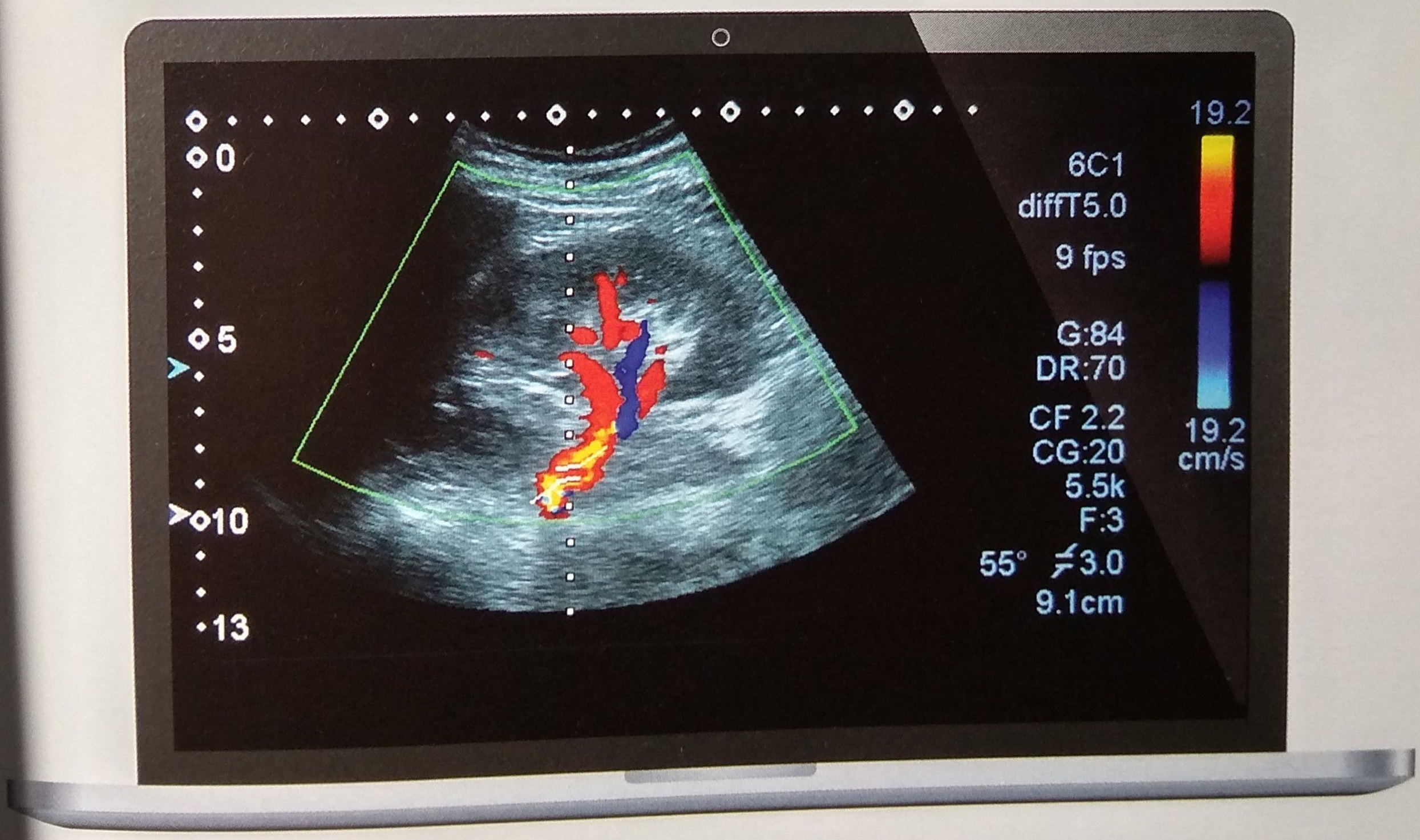
Gdy źródło emituje falę o znanej częstotliwości, a do nas dociera fala o innej częstotliwości, łatwo można wywnioskować, czy źródło fali zbliża się do nas, czy od nas oddala. Jeśli znamy częstotliwość fali nadawanej i częstotliwość fali rejestrowanej, to ze wzoru (1) można wyznaczyć prędkość, z jaką zbliża się do nas lub od nas oddala obserwowane źródło fali. Tą metodą astronomowie wyznaczają prędkości odległych galaktyk i innych obiektów – analizują zmiany częstotliwości światła docierającego do Ziemi w stosunku do światła wyemitowanego (częstotliwość wyemitowanego światła można określić na podstawie badań charakterystycznego świecenia różnych pierwiastków).

Dzięki zjawisku Dopplera potrafimy również wyznaczyć prędkości obiektów, które nie są źródłem rejestrowanej przez nas fali. W tym przypadku wykorzystuje się fakt, że fala o danej częstotliwości po odbiciu od ruchomego obiektu zmienia swoją częstotliwość

na taką, jakby to ruchomy obiekt był źródłem fali. Jeśli zmierzymy częstotliwość fali nadawanej i częstotliwość fali odbitej, możemy wyznaczyć prędkość obiektu.
Efekt zmiany częstotliwości fali po odbiciu od ruchomego obiektu jest wykorzystywany w radarach policyjnych do pomiaru prędkości samochodów, a w radarach wojskowych i cywilnych – do monitorowania ruchu statków i samolotów (ryc. 9.4).

Ryc. 9.4. Radary są stosowane w policji do mierzenia prędkości samochodów. W wojsku radary są jednym z urządzeń do kontroli obszaru

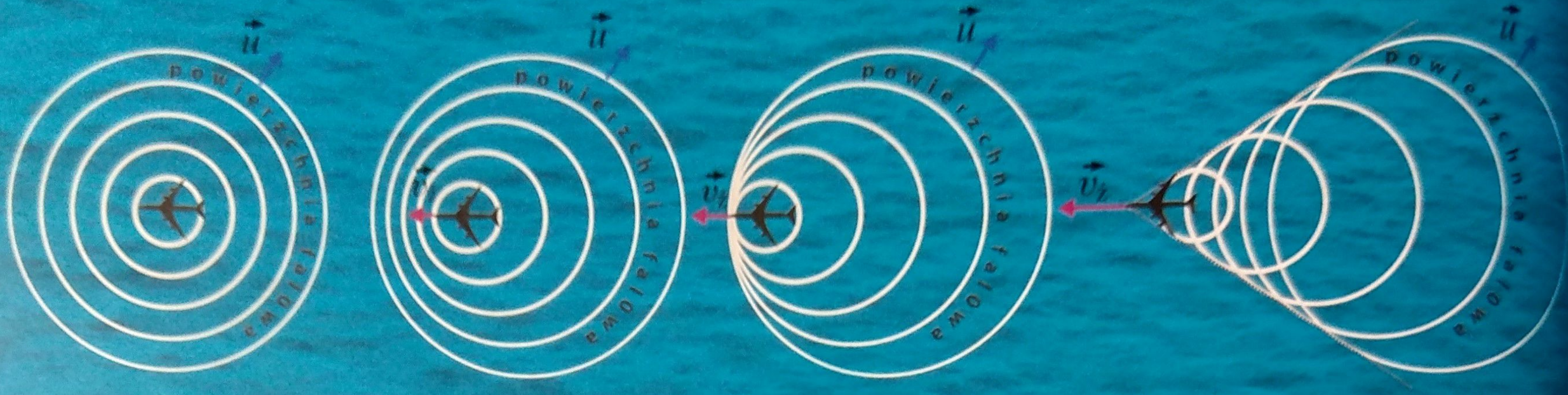
Za pomocą zjawiska Dopplera można badać prędkość przepływu płynów w przestrzeniach, do których nie mamy bezpośredniego dostępu. Na przykład ultrasonograf dopplerowski pozwala zobrazować prędkość przepływu krwi w naczyniach krwionośnych (ryc. 9.5).



Ryc. 9.5. Główne naczynia krwionośne nerki zobrazowane za pomocą USG dopplerowskiego. Czerwono-żółty obszar to tętnica nerkowa. Po prawej stronie zdjęcia widoczna skala prędkości przepływu krwi

Fale uderzeniowe

Fala uderzeniowa powstaje, gdy źródło fali porusza się z prędkością większą niż prędkość fali w danym ośrodku. Jest skutkiem nałożenia się na siebie powierzchni falowych wyemitowanych przez źródło w stałych odstępach czasu. Fale uderzeniowe mogą powstawać w różnych ośrodkach.



nieruchome źródło

źródło poruszające się z prędkością mniejszą od prędkości fali w ośrodku – efekt Dopplera

$v_ź < u$

źródło poruszające się z prędkością równą prędkości fali w ośrodku

$v_ź = u$

źródło poruszające się z prędkością większą niż prędkość fali w ośrodku – fala uderzeniowa

$v_ź > u$

Fala dziobowa

Falę uderzeniową, która powstaje na powierzchni wody za płynącą łodzią, nazywamy falą dziobową. Wysokość tej fali jest wprost proporcjonalna do masy płynącego obiektu i do mocy jego napędu. Z tego powodu mały skuter wodny z potężnym silnikiem wytwarza falę porównywalną z płynącą powoli barką.

Szybki ptak

Źródłem fali dziobowej może być również ptak, jeśli będzie płynął z prędkością większą niż prędkość rozchodzenia się fali w wodzie.

tor ruchu samolotu

fala uderzeniowa

C

B

A

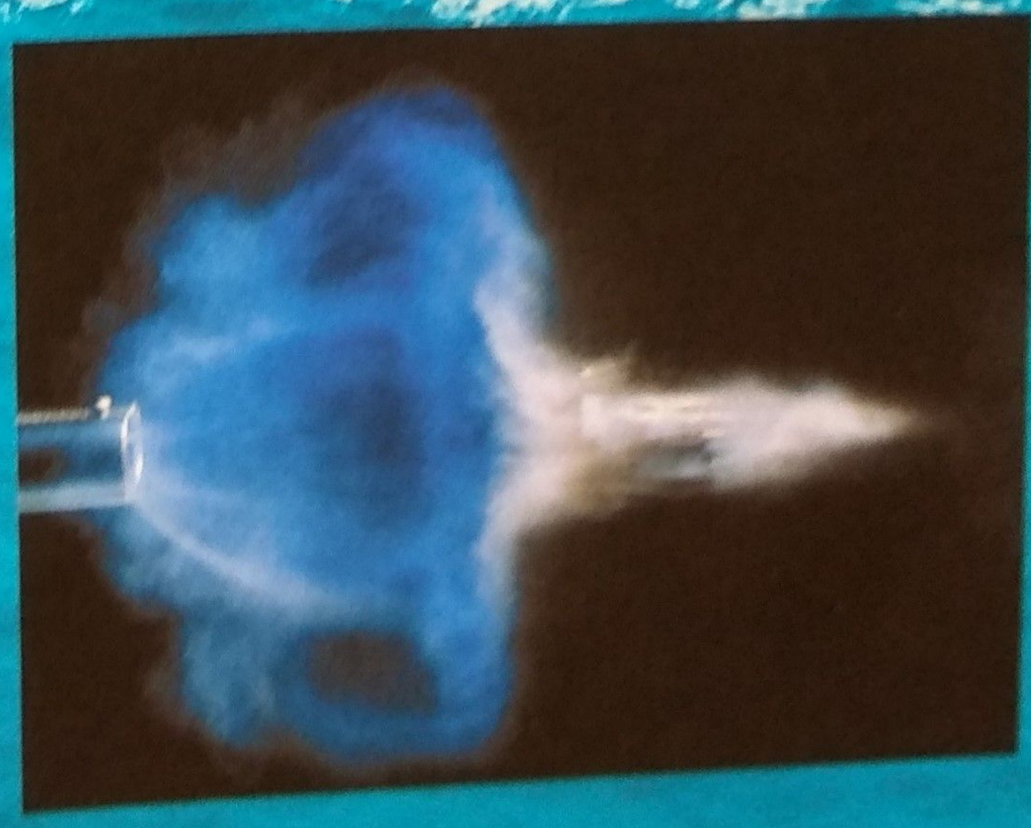
Obserwator C słyszy dźwięk dochodzący od samolotu.

Obserwator B słyszy huk fali uderzeniowej, będący skutkiem nałożenia się powierzchni falowych.

Obserwator A widzi przelatujący samolot, ale go nie słyszy.

Samolot ponaddźwiękowy

Za samolotem lecącym z prędkością większą niż prędkość dźwięku w powietrzu (ok. 1220 km/h = 1 Ma) powstaje fala uderzeniowa. Widoczne na fotografii obłoki skroplonej pary wodnej powstają na skutek gwałtownej zmiany ciśnienia powietrza, wywołanej tą falą.



Lecący pocisk

Wystrzelony pocisk wytwarza falę uderzeniową. Na zdjęciu widać obłoczki skroplonej pary wodnej w obszarach, w których zmiany ciśnienia powietrza są bardzo duże.

10. Dyfrakcja i nakładanie się fal

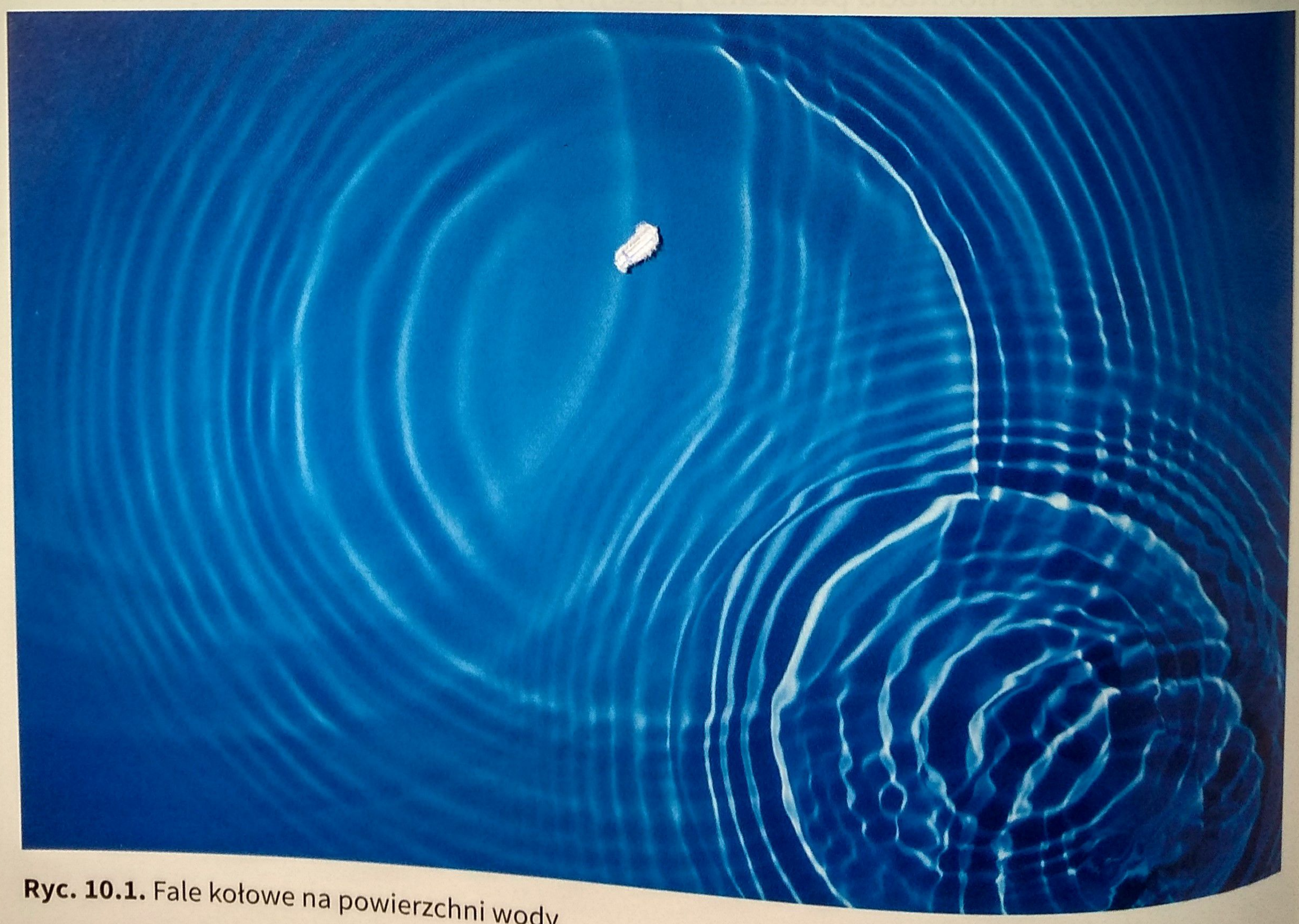
- Dyfrakcja fal
- Nakładanie się fal
- Rozpraszanie fal

Przypomnij sobie podstawowe wielkości fizyczne opisujące fale.

Fale przemieszczają się i przenoszą energię inaczej niż poruszające się ciała. Czy fale mogą zderzać się ze sobą tak jak kule? Czy można zmienić kierunek biegnącej fali? W tym rozdziale poznamy odpowiedzi na te pytania.

Dyfrakcja

Chyba każdy widział fale rozchodzące się na wodzie w czasie deszczu. Uderzenie każdej kropli w powierzchnię wody powoduje drgania tej powierzchni, które rozchodzą się w postaci fali kołowej. Tak dzieje się zawsze wtedy, gdy ośrodek jest jednorodny, czyli wszędzie ma takie same własności. Każdy punkt, do którego dociera fala, zaczyna drgać, zatem staje się źródłem nowej fali.

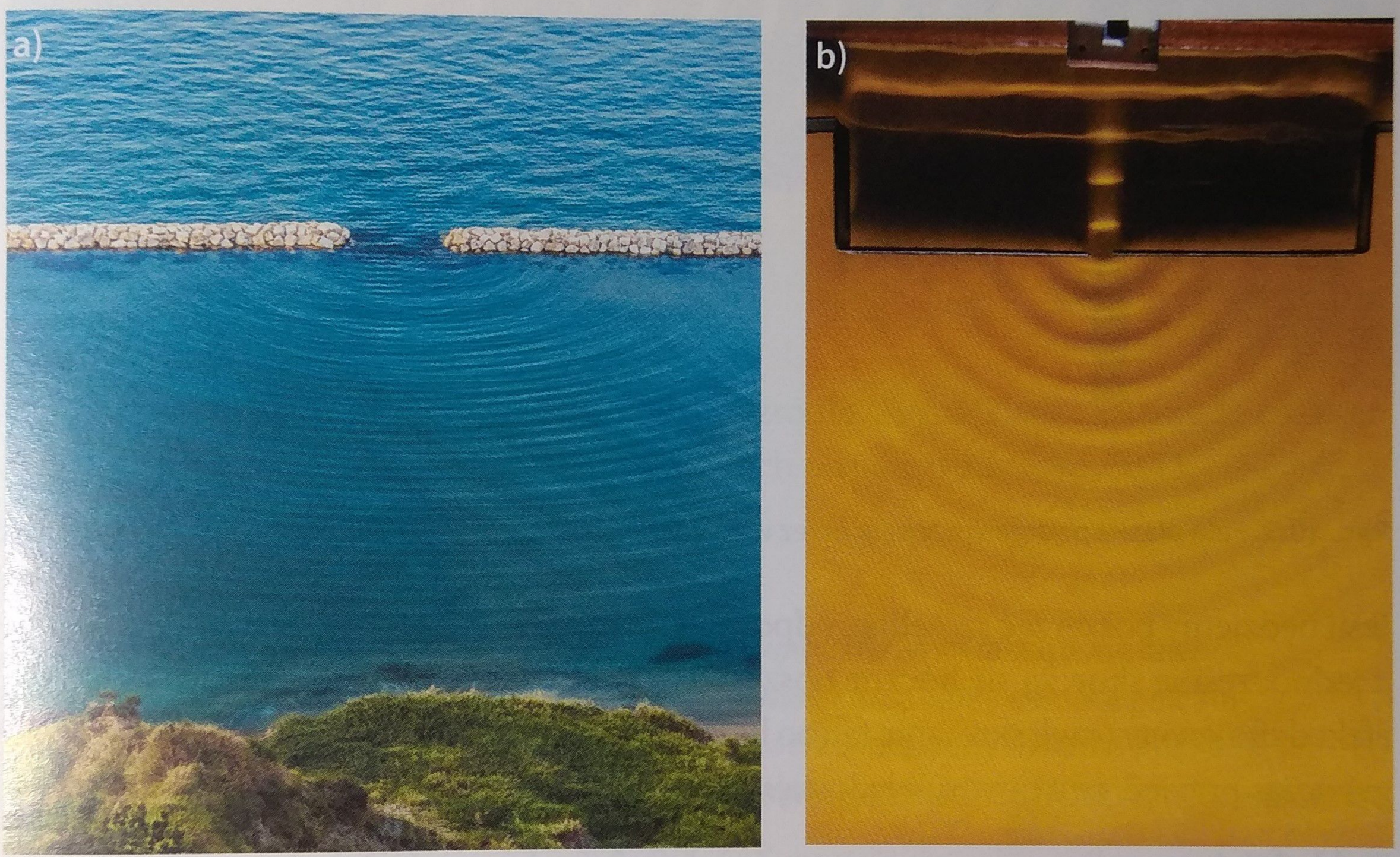


Ryc. 10.1. Fale kołowe na powierzchni wody

Punktowe źródło fali w ośrodku jednorodnym wywołuje w przestrzeni falę kulistą. Każdy punkt ośrodka, do którego dochodzi fala, staje się źródłem nowej fali kulistej.

Doświadczenie 1.

Do wanienki lub dużej miski nalej centymetrową warstwę wody. Ustaw na środku naczynia przeszkodę z niewielkim otworem (mogą to być dwie deseczki zbliżone do siebie). Uderzaj miarowo w powierzchnię wody dłuższą krawędzią linijki, ustawioną równolegle do przeszkody – w ten sposób wytworzysz falę płaską. Co widzisz za otworem?



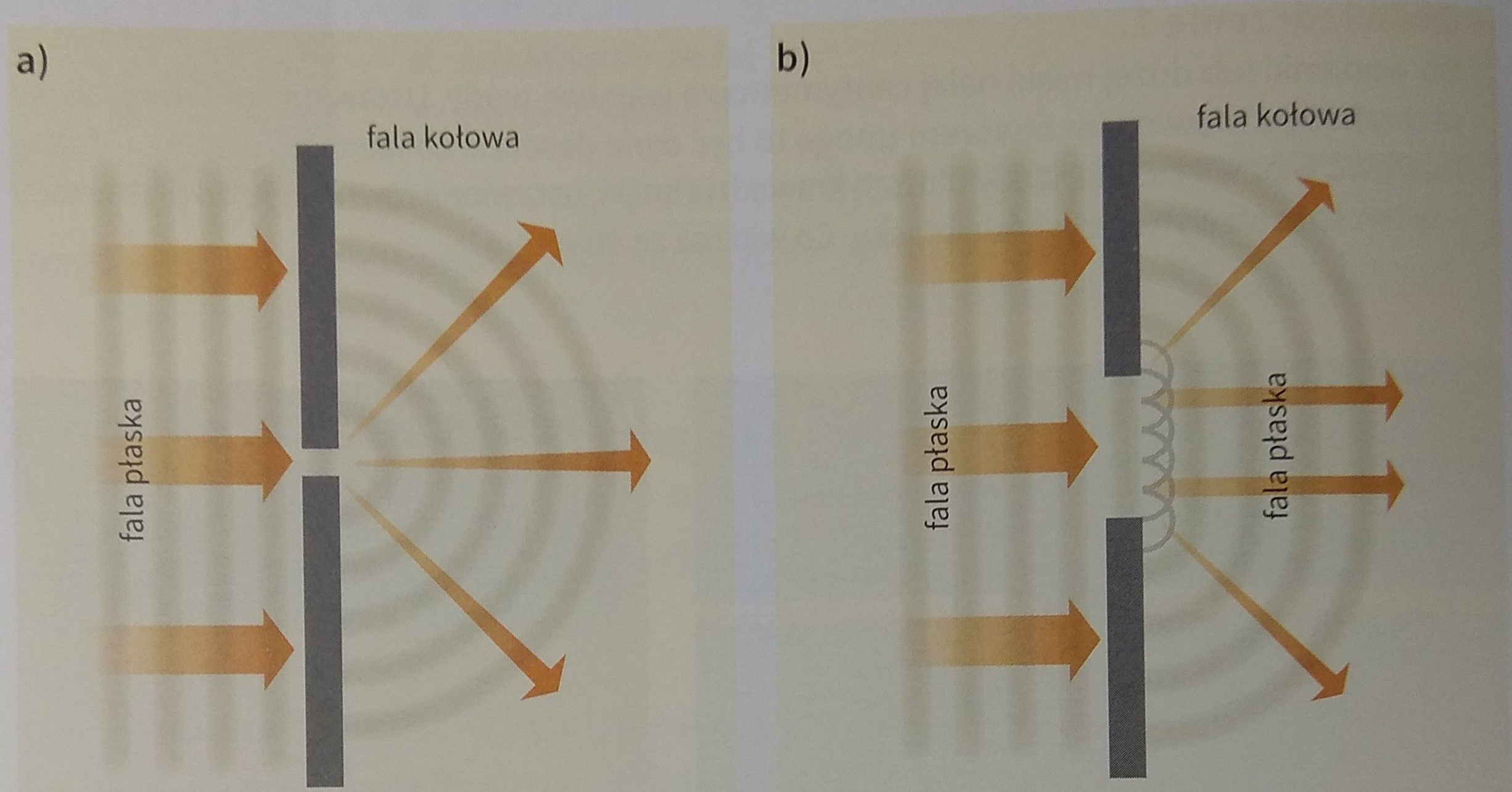
Ryc. 10.2. Fale na wodzie po przejściu przez szczelinę w warunkach naturalnych (a) i w warunkach doświadczenia szkolnego (b)

Gdy fala pada na niewielką szczelinę w przeszkodzie, za szczeliną rozchodzi się fala kołowa (ryc. 10.2). Zjawisko to nazywane jest ugięciem lub dyfrakcją fali.

Dyfrakcja (ugięcie) fali to zjawisko polegające na zmianie kształtu powierzchni falowych po ominięciu przez falę przeszkody.

Zmiana kształtu powierzchni falowych oznacza również zmianę kierunku rozchodzenia się fali. Gdy fala natrafia na przeszkodę ze szczeliną, może rozchodzić się dalej tylko od jednego miejsca drgającego, tego w szczelinie. Jeśli szczelina jest odpowiednio mała, można w przybliżeniu przyjąć, że drga tylko jeden punkt ośrodka. Zgodnie z wyżej wyrażoną zasadą wytwarza on falę kołową.

Jeśli szczelina jest szersza, punktów drgających jest więcej (ryc. 10.3). Przypuśćmy, że w danym momencie w szczelinie znajduje się akurat grzbiet fali. Od każdego z drgających punktów narysujmy półokrąg o promieniu równym długości fali. Obwiednia tych półokręgów będzie tworzyła grzbiet fali, która przeszła przez szczelinę.

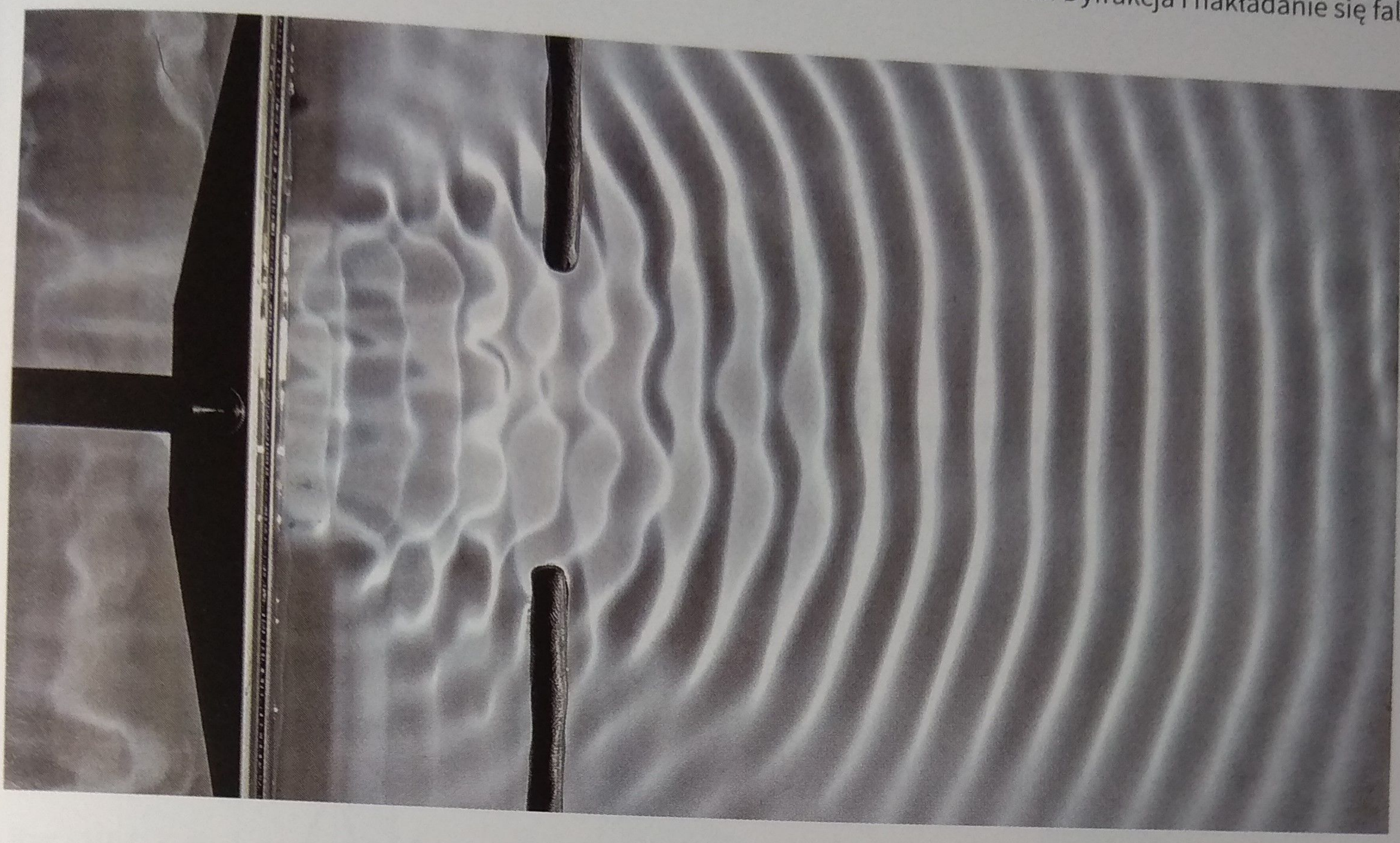


Ryc. 10.3. Fala płaska podczas przejścia przez wąską szczelinę (a) i szeroką szczelinę (b)

Jeśli będziemy poszerzać szczelinę, odpowiednio zwiększy się za nią obszar fali płaskiej, a jednocześnie skurczą się boczne obszary fali kołowej. Dla bardzo szerokich szczelin efekt dyfrakcyjny (czyli skręcanie fali bo bokach) będzie praktycznie niewidoczny. Można wówczas przyjąć, że z otworu wydostaje się fala płaska.

Dokładniejsza analiza pokazuje, że wyraźną dyfrakcję obserwuje się, gdy szerokość szczeliny jest porównywalna z długością fali λ. Gdy ta szerokość jest zdecydowanie większa od λ, po przejściu przez szczelinę fala tworzy wiązkę o szerokości praktycznie równej szerokości szczeliny.

Dyfrakcja zachodzi nie tylko przy przejściu fali przez szczelinę, ale także w sytuacji, gdy fala mija przeszkodę. Dzięki zjawisku dyfrakcji („skręcania") fali m.in. dźwięki nie rozchodzą się tylko wzdłuż linii prostej, lecz są dobrze słyszalne również za różnymi przeszkodami.



Ryc. 10.4. Dyfrakcja fali płaskiej na szerokiej szczelinie

Zasada superpozycji

Co się dzieje, gdy fale wytworzone przez dwa źródła się spotykają? Można to zaobserwować na przykładzie kropli deszczu padających na taflę wody (ryc. 10.1).

Doświadczenie 2.

Nalej centymetrową warstwę wody do miski lub wanienki. Wytwarzaj dwie fale:

a) kołowe, np. przez rytmiczne uderzanie w powierzchnię wody dwoma palcami;

b) płaskie, np. przez rytmiczne uderzanie w powierzchnię wody dwiema linijkami.

Obserwuj, czy fale podczas mijania się zmieniają swoją postać. Jeśli dobrze tego nie widać, nakręć filmy i odtwarzaj je w zwolnionym tempie.

Fale mijające się w tym samym ośrodku nie oddziałują ze sobą. Po prostu mijają się bez zmiany swoich własności, jakby się w ogóle nie zauważały. Jakie drgania obserwujemy zatem w punkcie mijania się fal? Odpowiedzią na to pytanie jest zasada superpozycji.

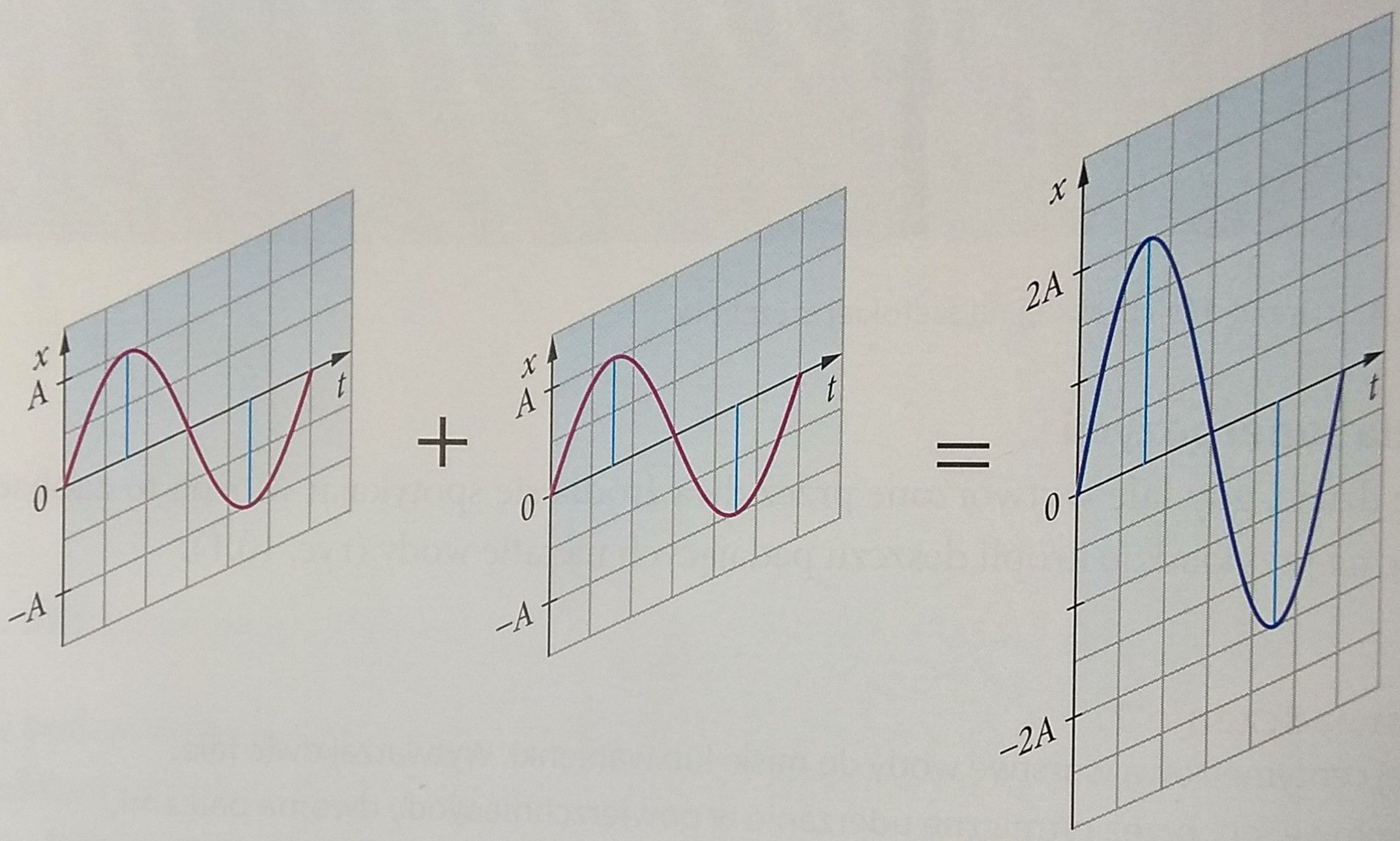
Zasada superpozycji

Wychylenie punktu, do którego dochodzą dwie fale, jest sumą wychyleń pochodzących od obu fal.

Rozważmy, jak będzie drgał punkt, do którego dochodzą dwie identyczne fale w tych samych fazach (tzn. grzbiety obu fal docierają do tego punktu jednocześnie). Jeśli spotykają się dwa takie same grzbiety, to wychylenie wynikające z każdej z dwóch fal jest maksymalne i równe A, czyli amplitudzie fali. Wychylenie danego punktu jest

zatem sumą obu wychyleń, czyli w tym momencie wynosi $2A$ (ryc. 10.5). Jeśli właśnie spotykają się doliny obu fal, to wychylenie danego punktu jest równe $-2A$. W tym punkcie będziemy zatem widzieć dwukrotnie wyższe grzbiety i dwukrotnie głębsze doliny. Oznacza to, że w danym punkcie ośrodka drgania mają dwukrotnie większą amplitudę, czyli efektem nałożenia się fal jest wzmocnienie drgań ośrodka.

Dwie takie same fale **wzmacniają się** maksymalnie w punktach, do których docierają drgania w tych samych fazach.



Ryc. 10.5. Gdy nakładają się na siebie takie same drgania w tej samej fazie, powstają drgania o dwukrotnie większej amplitudzie

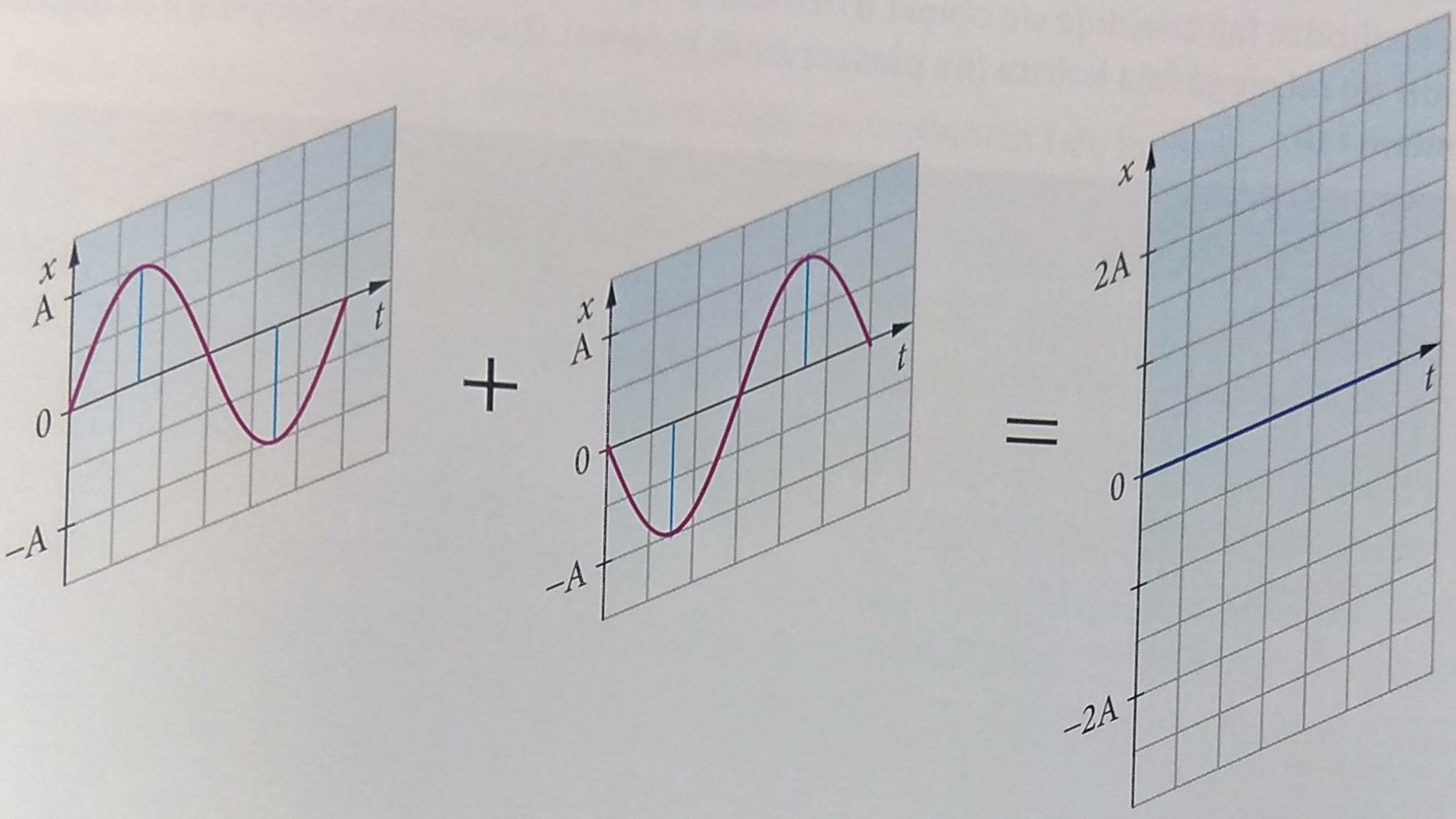
Rozważmy teraz, jak będzie drgał punkt, do którego dochodzą dwie identyczne fale w przeciwnych fazach. Jeśli grzbiet fali spotyka się z doliną, to wychylenie jednej fali ma wartość A, a drugiej jest równe $-A$, gdzie A jest amplitudą fali.

Wychylenie danego punktu ośrodka jest sumą obu wychyleń, czyli:

$$x = A + (-A) = 0$$

W tym punkcie wychylenie będzie równe zero (ryc. 10.6). Będzie tak w każdym momencie, o ile fale mają tę samą długość i tę samą amplitudę. Identyczne fale spotykające się w przeciwnych fazach wygaszają się całkowicie.

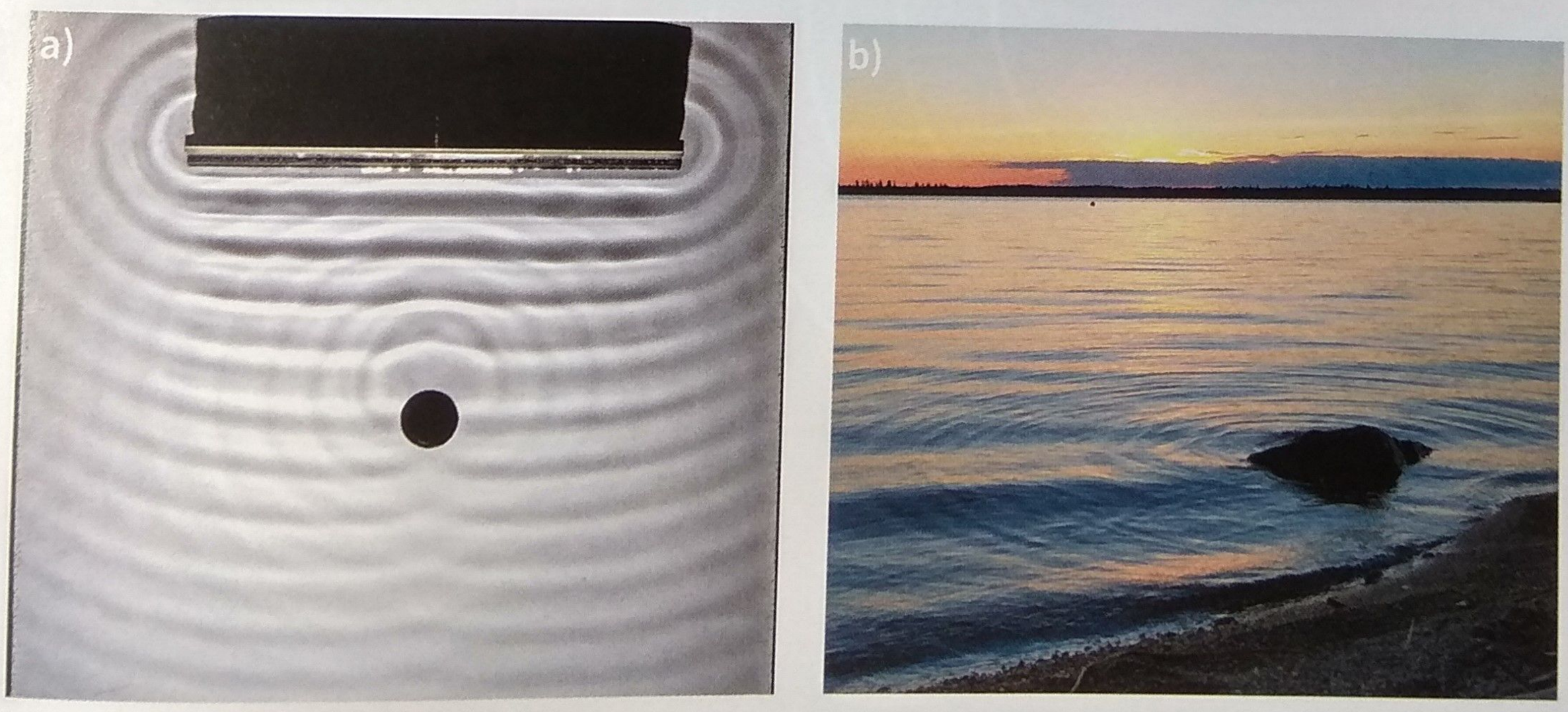
Dwie takie same fale **wygaszają się** w punktach, do których docierają drgania o przeciwnych fazach.



Ryc. 10.6. Gdy w danym punkcie nakładają się takie same drgania o przeciwnych fazach, następuje całkowite wygaszenie drgań

W rzeczywistości to, co widzimy jako jedną falę, jest efektem złożenia wielu mniejszych fal. Z każdego drgającego punktu rozchodzi się fala kulista. Fale te nakładają się na siebie, a matematycznie wyraża to zasada superpozycji. Fala, którą obserwujemy, jest wynikiem nałożenia się ogromnej liczby fal kulistych.

Rozpraszanie fal



Ryc. 10.7. a) Fale na wodzie wzbudzone w wanience z nieruchomą przeszkodą. **b)** Leżący kamień rozprasza falę na wodzie

Co się dzieje, gdy fala napotyka przeszkodę o rozmiarach porównywalnych z jej długością? Rycina 10.7 przedstawia dwa przykłady fali płaskiej, która napotyka widoczną przeszkodę. Widzimy fale kołowe rozchodzące się wokół przeszkody.

Gdy na drodze fali znajduje się obiekt o rozmiarach porównywalnych z jej długością, rozchodzi się od niego fala kulista (na płaszczyźnie kołowa). Zjawisko to nazywamy **rozproszeniem fali**.

Na przykład gdy krzykniemy w lesie, fala dźwiękowa rozprasza się na pniach drzew. Do słuchającego z różnych kierunków docierają fale rozproszone, dlatego często ma on kłopot z ustaleniem kierunku, z którego dochodzi wołanie.

Rozpraszanie fal dźwiękowych na małych przeszkodach wykorzystują między innymi nietoperze. Emitują one ultradźwięki o częstotliwościach do 200 kHz. Te fale są rozpraszane przez latające owady. Dzięki odebraniu fali rozproszonej nietoperz jest w stanie ustalić dokładne położenie owada.

Ryc. 10.8. Nietoperz namierza owady dzięki echolokacji